

■ 論 文 ■

## 고속도로 교통사고로 인한 비 반복 혼잡 추정 연구

An Analytical Procedure to Estimate Non-recurrent Congestion caused by Freeway Accidents

정 연 식

(한국교통연구원 부연구위원)

조 한 선

(한국교통연구원 연구위원)

김 주 영

(한국교통연구원 부연구위원)

### 목 차

- |  |  |
|--|--|
| <p>I. 서론</p> <p>II. 연구의 범위 및 적용자료</p> <p>    1. 연구의 범위</p> <p>    2. 적용자료</p> <p>III. 고속도로 교통사고로 인한 혼잡의 추정</p> | <p>1. 혼잡의 분류 및 정의</p> <p>2. 교통사고로 인한 혼잡의 추정방안</p> <p>3. 교통사고로 인한 혼잡 추정 결과</p> <p>IV. 결론 및 향후과제</p> <p>참고문헌</p> |
|--|--|

Key Words : 고속도로, 교통사고, 교통혼잡, 반복적 발생 혼잡, 비 반복적 발생 혼잡, 총지체  
 Freeway, Traffic Accident, Traffic Congestion, Recurrent Congestion, Non-recurrent Congestion,  
 Total Delay

### 요 약

본 논문의 목적은 고속도로 교통사고로 인한 비 반복적 발생 혼잡을 추정하기 위한 방법을 개발하고, 개발된 방법을 국내 고속도로 교통사고에 적용하여 비 반복적 발생 혼잡을 추정하는 것이다. 교통사고로 인한 비 반복적 발생 혼잡은 반복적으로 혼잡이 발생하는 지역에서도 발생하기 때문에, 반복적으로 발생하는 혼잡과 비 반복적으로 발생하는 혼잡의 구분이 매우 중요하다. 이를 위해 본 논문에서는 각 구간별, 시간대별 평균속도와 교통사고로 인해 낮아진 속도와의 차이를 활용하였다. 본 연구에서는 제안된 방법을 활용하여 2008년 1년간 수집된 교통류 자료와 2008년에 발생한 교통사고 자료의 융합을 통한 비 반복적 발생 혼잡을 추정하였다. 이러한 교통사고로 인한 비 반복적 발생 혼잡은 교통사고 관련 개선 프로그램의 효과분석, 교통사고 대응 전략의 수립, 비 반복적 발생 혼잡비용의 추정을 통한 교통혼잡비용의 추정방법의 개선 등에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

The objective of this paper is to develop and apply a method that estimates the amount of traffic congestion (vehicle hours of delay) caused by traffic accidents that occur on freeways in Korea. A key feature of this research is the development of a method to separate the non-recurrent delay from any recurrent delay that is present on the road at the time and place of a reported accident. The main idea to separate these two delays is to use the speed difference between speed under accident condition and speed under normal flow condition. For the case study application, two datasets were combined to accomplish the objective of the study: (1) accident data and (2) traffic flow data. Eventually, the results can be useful for the performance evaluation of accident reduction program, for strategic plans to cope with congestion caused by traffic accidents, and for rectification of the estimation method for traffic congestion costs.

본 연구는 한국교통연구원 기본과제로 수행한 “비 반복적 발생 지정체로 인한 혼잡비용 추정방안 연구(2009년)”를 기초로 작성하였음.

## I. 서론

일반적으로 도로에서 발생하는 교통 혼잡은 반복적으로 발생하는 혼잡과 비 반복적으로 발생하는 혼잡으로 구성된다. 반복적으로 발생하는 혼잡은 교통 수요 대비 도로의 용량 부족으로 인해 발생하는 것으로 주로 출퇴근 시간에 발생하는 혼잡을 말한다. 반면에 비 반복적으로 발생하는 혼잡은 교통사고, 차량의 고장, 도로에서의 작업 등과 같은 도로의 돌발 상황에 의해 발생된다.

이러한 비 반복적 발생 혼잡은 다소 많이 알려지지 않았으나, 몇몇 분석가들은 이러한 혼잡의 비중이 매우 높다는 연구 결과를 제시하였다. 90년대, 캘리포니아 교통부(Caltrans, 1999)는 이러한 혼잡이 전체 혼잡의 절반을 차지하는 것으로 제시하였으며, Lindly(1986)와 Lomax 외 연구진(1997)에 의한 연구에서는 전체 혼잡의 약 60%를 차지하는 것으로 분석하였다. 그러나 최근 분석 결과에 의하면, 이러한 비율은 지역적 특성에 따라 13-30%(Skabardonis et al., 2003), 18%(Kwon et al., 2006), 5-53%(Skabardonis & Geroliminis, 2004) 등 매우 다양하게 나타났다. 또한, 2007년 OECD(Organization for Economic Cooperation and Development)에서 보고한 주요 국가별 혼잡의 원인별 구성 비율에 의하면, 독일, 미국, 프랑스는 각각 전체 혼잡의 14%, 60%, 64%가 비 반복적 발생 혼잡인 것으로 나타났다.

Dowling 외 연구진(2004)은 현재 비 반복적 혼잡을 추정하기 위한 신뢰할 만한 방법은 존재하지 않는 것으로 분석하였다. 전술한 기존 연구의 대부분은 일괄적으로 설정된 혼잡 기준 속도를 활용하여 비 반복적 발생 혼잡을 추정하거나, 타 지역에서 추정된 비율을 적용하는 방식이 대부분이었다. 따라서 비 반복적 발생 사건의 시공간적 여파를 충분히 고려하지 않았다는 한계가 있다. 이러한 한계는 충격파 이론(shockwave theory) 혹은 결정적 대기행렬 이론(deterministic queuing diagram) 등을 활용하여 이론적으로는 극복할 수 있지만, 도로에서 발생한 사건에 대한 보다 정밀한 정보가 (예, 도로의 차단 시간, 차단된 차로 수, 교통량, 용량 등) 요구되며, 현재 이러한 정보를 구축하여 관리하기 위해서는 기술적, 경제적 제약이 따르므로 아직 시도되지 못하고 있는게 현실이다.

따라서 본 연구는 고속도로에서 발생한 교통사고 정보와 차량검지체계(VDS: vehicle detection system)를 통한 교통류 자료를 활용하여, 고속도로에서 발생한 교통사고로 인한 혼잡을 추정하고자 하였다. 본 연구에

서 제시된 고속도로 교통사고로 인한 비 반복적 혼잡은 교통관련 기본 지표로 다양한 분야에서 활용될 수 있을 것으로 기대되며, 나아가 다양한 원인(기상악화, 도로공사 등)에 의한 비 반복적 발생 혼잡의 계량화를 통해 전체 비 반복적 발생 혼잡의 추정에 대한 기반을 제공할 것으로 기대된다.

## II. 연구의 범위 및 적용자료

### 1. 연구의 범위

본 연구는 VDS 자료를 기반으로 수행되기 때문에, 공간적 범위는 VDS 자료의 활용이 가능한 고속도로로 제한하였다. 또한, 본 연구는 2008년을 시간적 범위로 제한하였으며, 내용적으로는 다양한 비 반복적 발생 혼잡의 요소 중 교통사고로 인한 비 반복적 발생 혼잡을 추정하는 것으로 제한하였다. 비록 비 반복적 발생 혼잡의 요소는 교통사고 외에도 기상악화, 도로 공사, 차량의 고장 등을 포함하지만, 교통사고로 인한 비 반복적 발생 혼잡의 여파는 가장 클 것으로 판단되며, 교통사고로 인한 비 반복적 발생 혼잡의 추정 방법은 기타 비 반복적 발생 사건으로 인한 혼잡의 추정 방법의 기반이 될 것으로 판단하여 우선 교통사고로 인한 비 반복적 발생 혼잡을 추정하였다.

### 2. 적용자료

본 연구는 2가지 자료가 활용된다. 첫째, 통행량과 속도와 같은 교통류 관련 자료이며, 이들 자료는 국토해양부 교통정보센터에 수집되는 VDS 기반 자료를 활용하였다. 이 자료는 ITS 표준 노드·링크 기반으로 수집되어 5분단위로 관리되며, 2008년 말 본선에 대한 링크의 총 수는 2,064개, 평균 거리는 약 3.4km로 나타났다. 따라서 5분단위로 관리되는 교통류 자료가 100% 수집되었을 경우, 약 2억 1천만 여건의 교통류 자료가 수집된다. 그러나 VDS기반 교통류 자료는 VDS 관련 통신 및 자체 장비의 정검으로 인한 일시적 운영 정지 등의 원인으로 인하여 결측치(missing data)가 존재한다. 결과적으로 본 연구에 활용된 교통류 자료는 수집 가능한 자료의 67%에 해당하는 약 1억 4천만 건만이 포함되었다. <표 1>은 수집된 교통류 자료의 형식을 나타낸다.

<표 1> 교통류 자료의 형식

링크 ID	시간	속도(km/h)	교통량(대)
1610004700	2008-01-01 00:01:37	97	31
1610004800	2008-01-01 00:01:37	110	12
⋮	⋮	⋮	⋮

둘째, 고속도로 교통사고 자료이며, 2008년 한 해 동안 27개 주요 고속도로에서 총 2,449건의 교통사고가 발생된 것으로 나타났다). 수집된 교통사고 정보는 사고시간, 사고특성, 환경조건, 운전자 특성, 도로 기하구조 및 포장 상태, 사고 접수 방법 등 6개의 항목으로 구분할 수 있다. 그러나 몇몇 자료들은 입력과정 시 오류로 인해 완전한 형식을 갖추지 못했기 때문에 연구에 제외되었다. 결과적으로 4건의 사고 자료를 제외한 총 2,445건의 교통사고 자료가 분석에 적용되었다.

각 교통사고에 대한 비 반복적 발생 혼잡을 분석하기 위해서는 교통류 자료와 교통사고 자료의 융합이 필요하다. 즉, 교통사고 발생 시점과 지점에 관련된 교통류 자료의 분석이 병행되어야 한다. 그러나 교통사고 자료에서 교통사고 발생 지점은 고속도로의 이정에 의해 관리되며, ITS 표준 노드·링크 기반 고속도로 구간은 전자지도 체계로 운영되어 교통사고 발생 지점에 대한 관련 고속도로 구간의 매치는 GIS(Geographic Information System)의 선형 참조(linear referencing) 기법을 활용하였다. 이후 참조된 구간 및 상류부 구간에 대한 교통류 자료는 교통사고 발생 시간을 기반으로 참조·활용하였다. 이러한 작업은 1억 건 이상의 대용량 자료를 검색하여 진행되기 때문에 자료의 검색 및 처리시간에 대한 부하가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 이와 같이 대용량 자료의 처리를 위해 데이터베이스 관리 시스템(Database Management System: DBMS)을 활용하였다.

### III. 고속도로 교통사고로 인한 혼잡의 추정

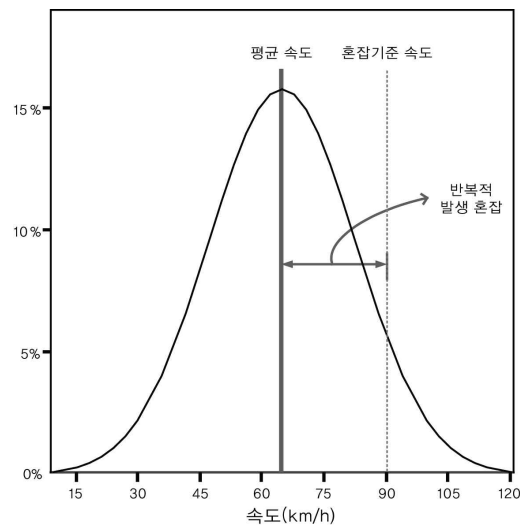
#### 1. 혼잡의 분류 및 정의

비 반복적으로 발생하는 혼잡을 계량화하기 위해서는 우선 비 반복적으로 발생하는 혼잡과 반복적으로 발생하는 혼잡을 구분해야 한다. 일반적으로 이러한 혼잡의 구

분은 발생 원인에 의해 구분된다. 즉, 교통사고, 노면잡물, 도로 작업, 기상 악화 등과 같은 돌발 상황에 의한 혼잡은 비 반복적 발생 혼잡으로 구분된다. 그러나 수요의 정규 분산에 의해 발생된 혼잡은 반복적 발생 혼잡으로 구분된다.

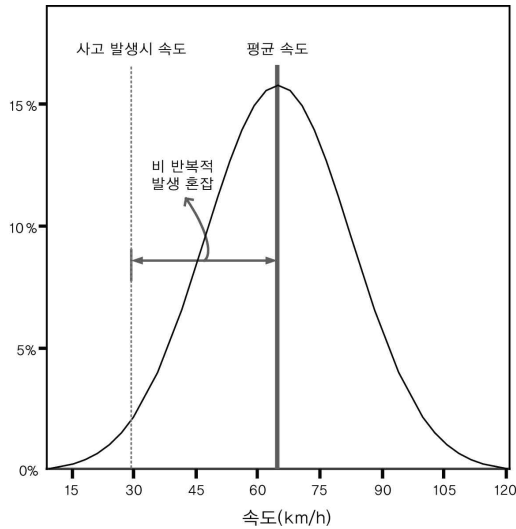
즉, 반복적 발생 혼잡은 도로의 수요가 도로의 용량을 주기적으로 초과하여 발생하는 것으로 주로 출퇴근 시간에 주기적으로 발생하는 혼잡을 일컫는다. 이러한 반복적 혼잡의 추정을 위해서는 일반적으로 미리 설정된 혼잡기준 속도 보다 낮은 구간 평균 속도와의 차이를 활용한다. Skabardonis 외 연구진(2003)은 캘리포니아 고속도로의 경우 35mph 혹은 60mph를 혼잡기준 속도로 정의하여 사용하였으며, 조한선 외 연구진(2007)은 국내 교통 혼잡비용을 추정하기 위하여 편도 2차로 이상의 고속도로의 경우 90km/h를 혼잡기준 속도로 정의하여 사용하였다. 이러한 개념은 속도의 분포를 활용하여 <그림 1>과 같이 설명할 수 있다. 이 그림은 현재 한국교통연구원에서 매년 추정하여 제시하고 있는 교통혼잡비용의 추정에 활용되는 방식으로 편도 2차로 이상 고속도로에서 반복적 발생 혼잡을 정의하기 위한 예를 나타낸다.

반면에 비 반복적 발생 혼잡은 예고 없이 돌발적으로 발생한 사건에 의한 혼잡을 일컫는다. 따라서 비 반복적 발생 혼잡은 반복적으로 혼잡이 발생하는 구간에서도 발생하게 된다. 예를 들어, <그림 2>와 같이 반복적으로 혼



<그림 1> 반복적 발생 혼잡의 예

1) 연구에 사용된 고속도로 교통사고 자료는 한국도로공사에서 수집 및 관리되고 있는 자료를 활용하였음



<그림 2> 비 반복적 발생 혼잡의 예

잡이 발생하여 평균속도가 약 65km/h인 구간에 대하여, 교통사고와 같이 비 반복적 발생 사건으로 인하여 구간 통행속도가 일시적으로 약 30km/h로 감소된 경우, 비 반복적 발생 혼잡은 평균 속도 65km/h와 사고 발생으로 인한 속도 30km/h와의 편차로 인한 혼잡을 나타낸다(Recker et al., 2005; Chung, 2008).

2. 교통사고로 인한 혼잡의 추정 방안

1) 고속도로의 속도 분포

전술한 바와 같이, 본 연구에서는 고속도로 전 구간에 대하여 1년간 수집된 통행 속도 및 통행량 자료를 활용한다. 따라서 특정 고속도로의 구간  $j$ 에 대하여 특정 요일의 시간대  $t_m$ 에 대한 1년간 통행 속도 자료는 총 52개가 수집 가능하다. 만일  $n$ 번째 관측치에 대한 속도를  $s_{jm}(t_m)$ 라 할 경우, 이 속도에 대한 분포  $\Omega_{jm}$ 는 속도의 평균  $\bar{s}_j(t_m)$ 과 표준편차  $\sigma_{s_j(t_m)}$ 를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Omega_{jm} = \Omega(\bar{s}_j(t_m), \sigma_{s_j(t_m)}) \tag{1}$$

이러한 분포는 모든 고속도로의 구간에 대하여, 그리고 모든 시간대에 대하여 구축할 수 있다. 따라서 각 고속도로의 구간 및 시간대별 속도 분포는 <표 2>와 같이 행렬형식으로 구축될 수 있다.

만일 교통사고가  $t_1$  시간대에 고속도로 구간  $i$ 에서 발생했다고 가정할 경우, 이 사고에 의해 영향을 받는 구간 및 시간에 대한 속도  $\hat{s}_i(t_m)$ 는 <표 2>와 유사한 행렬에 의해 관찰할 수 있다. <표 3>은 사고에 의한 속도를 관측하기 위하여 사고 발생 이후, 사고 발생 지점의 상류부에 대한 구간별, 시간대별 속도 행렬을 나타낸 것이다.

사고의 발생 시, 이로 인한 속도의 감소 여파는 시간이 지날수록 관련 구간의 상류부로 점점 확산되며, 이러한 현상은 충격파라 부른다(Lighthill & Whitham, 1955), <그림 3>은  $t_1$  시간대에 고속도로 구간  $i$ 에서 발생한 교통사고에 대한 여파(충격파)를 개념적으로 나타낸 것이다. 이 그림에서 진하게 표시된 셀의 속도는 사고에 의해 영향을 받은 속도를 나타내며, 이 셀들을 연결하는 상부의 직선은 사고로 인한 충격파를 나타낸다. 또한, 하부에 점선은 사고처리 이후 혼잡했던 구간이 풀리며 형성된 또 다른 충격파를 나타낸다. 이 두 곡선이 만나는 지점이 사고로 인한 혼잡이 사라지는 지점이며, 만일 진하게 표시된 셀들에 대한 낮아진 속도와 통행량을 구하면, 사고로 인한 혼잡을 추정할 수 있다.

<표 3> 교통사고에 의한 시간대별 구간별 속도

시간	고속도로 구간(차량 진행 방향 : ←)			
	$i$	$i-1$	$i-2$	...
$t_1$	$\hat{s}_i(t_1)$	$\hat{s}_{i-1}(t_1)$	$\hat{s}_{i-2}(t_1)$	...
$t_2$	$\hat{s}_i(t_2)$	$\hat{s}_{i-1}(t_2)$	$\hat{s}_{i-2}(t_2)$	...
$t_3$	$\hat{s}_i(t_3)$	$\hat{s}_{i-1}(t_3)$	$\hat{s}_{i-2}(t_3)$	...
⋮	⋮	⋮	⋮	...

<표 2> 시간대별 구간별 고속도로 속도 분포

시간	고속도로 구간			
	...	$i$	$i-1$	...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$t_m$	...	$\Omega_{i,m} = \Omega(\bar{s}_i(t_m), \sigma_{s_i(t_m)})$	$\Omega_{i-1,m} = \Omega(\bar{s}_{i-1}(t_m), \sigma_{s_{i-1}(t_m)})$	...
$t_{m+1}$	...	$\Omega_{i,m+1} = \Omega(\bar{s}_i(t_{m+1}), \sigma_{s_i(t_{m+1})})$	$\Omega_{i-1,m+1} = \Omega(\bar{s}_{i-1}(t_{m+1}), \sigma_{s_{i-1}(t_{m+1})})$	...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

시간	고속도로 구간(차량 진행 방향 : ←)				
	$i$	$i-1$	$i-2$	$i-3$	...
$t_1$	$\hat{s}_i(t_1)$	$\hat{s}_{i-1}(t_1)$	$\hat{s}_{i-2}(t_1)$	$\hat{s}_{i-3}(t_1)$	...
$t_2$	$\hat{s}_i(t_2)$	$\hat{s}_{i-1}(t_2)$	$\hat{s}_{i-2}(t_2)$	$\hat{s}_{i-3}(t_2)$	...
$t_3$	$\hat{s}_i(t_3)$	$\hat{s}_{i-1}(t_3)$	$\hat{s}_{i-2}(t_3)$	$\hat{s}_{i-3}(t_3)$	...
$t_4$	$\hat{s}_i(t_4)$	$\hat{s}_{i-1}(t_4)$	$\hat{s}_{i-2}(t_4)$	$\hat{s}_{i-3}(t_4)$	...
$t_5$	$\hat{s}_i(t_5)$	$\hat{s}_{i-1}(t_5)$	$\hat{s}_{i-2}(t_5)$	$\hat{s}_{i-3}(t_5)$	...
$t_6$	$\hat{s}_i(t_6)$	$\hat{s}_{i-1}(t_6)$	$\hat{s}_{i-2}(t_6)$	$\hat{s}_{i-3}(t_6)$	...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

<그림 3> 교통사고에 의한 충격파의 개념도

2) 사고로 인한 혼잡의 구분 방안

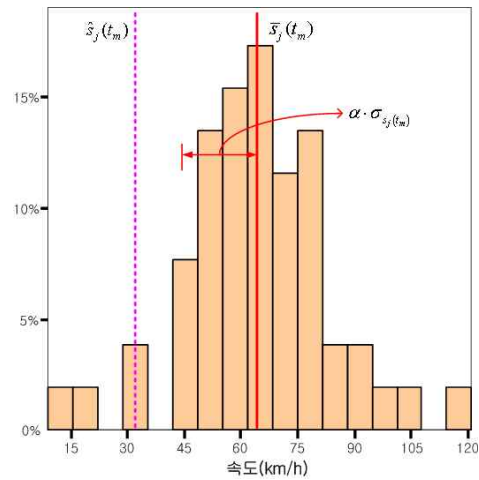
<그림 2>에 제시된 바와 같이, 사고로 인한 비 반복적 발생 혼잡은 구간 평균 속도와 사고로 인해 낮아진 속도와의 편차로 인한 혼잡으로 정의하였다. 또한, 각 구간별 속도에 대한 분포(<표 2> 참조)와 속도의 측정치(<표 3> 참조)를 구축하였기 때문에, 이를 기반으로 각 구간별, 시간대별 속도와 관련 구간별, 시간대별 평균속도를 계산할 수 있다.

일반적으로 사고 발생 이후, 사고 발생 지점으로부터 상류부의 속도는 평균 통행속도보다 낮아지게 될 것이기 때문에, 비 반복적 발생 혼잡의 계산은 쉽게 이루어진다. 그러나 단순히 평균속도와의 편차를 비 반복적 발생 혼잡으로 계산할 경우, 비 반복적 발생 혼잡은 과대 추정될 가능성이 있다. 즉, 도로의 통행 속도는 비 반복적 발생 사건과는 무관하게 교통의 동적 특성으로 인하여 속도가 일정하기보다 편차가 존재한다. 따라서 이러한 교통의 동적 특성과 사고로 인한 속도를 구분하기 위하여 본 연구에서는 다음과 같이 속도의 판별값을 적용하였다.

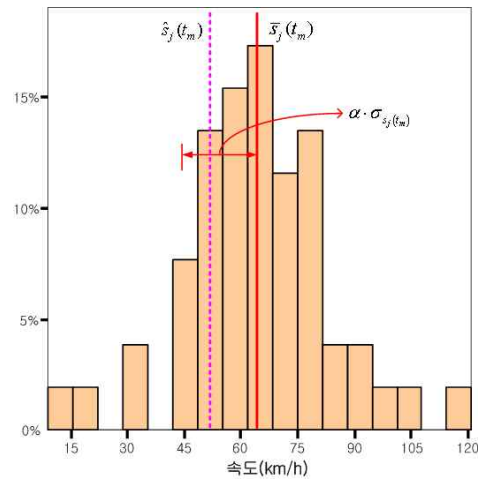
$$\text{판별값} = \bar{s}_j(t_m) - \alpha \cdot \sigma_{s_j(t_m)} \quad (2)$$

여기에서  $\alpha$ 값이 0에 가까울수록 판별값은 속도의 표준편차에 둔감하고 반면 점점 커질수록 판별값은 속도의 표준편차에 민감함을 알 수 있다.

이 식을 활용하여, 만일 판별값이 속도  $\hat{s}_j(t_m)$ 보다 크다면 이 속도는 사고에 의한 속도로 판정하여 비 반복 혼잡의 계산에 포함하였다. 그러나 이 값이 속도  $\hat{s}_j(t_m)$ 보다 작다면 이 속도는 교통의 동적 특성에 의한 속도로 간주하



<그림 4> 비 반복적 발생 사건으로 인한 속도



<그림 5> 교통의 동적 특성으로 형성된 속도

여 비 반복 혼잡의 계산에서 제외시켰다. <그림 4>와 <그림 5>는 이러한 속도들의 판별결과를 나타낸다.

본 연구에서  $\alpha$ 값은 0.25로 설정하였다. 이 값의 설정은 약 50여개의 사고 자료를 발생 지역 및 발생 시간에 관계없이 무작위로 선정한 후,  $\alpha$ 값을 0.00부터 0.05씩 증가시키며, 이로 인해 선택된 혼잡영역(<그림 3>의 음영부분)을 관찰하였다. 즉, 각기 다른  $\alpha$ 값을 적용하여 선정된 <그림 3>의 음영지역 및 그 외 지역의 실제 속도와 평균 속도와의 차이를 분석한 결과  $\alpha$ 값이 0.25일 경우 <그림 3>의 음영지역을 가장 잘 구분하는 것으로 나타났다. 비록  $\alpha$ 값은 각 구간별, 시간대별 각기 다른 값을 산정하여 적용해야 하지만, 동일한  $\alpha$ 값이 적용되더라도 각 링크별, 각 5분 간격 시간대별 속도의 표준편차

$(\sigma_{s_j(t_m)})$ 는 모두 다르기 때문에 결과적으로 관별값 또한 각기 다르게 나타난다.

### 3) 사고로 인한 혼잡 영역의 구축

구축된 자료를 통해 사고로 인한 속도와 교통의 동적 특성으로 인한 속도의 구분이 가능하더라도, 사고로 인한 혼잡여파는 특정시간 이후 특정 지점에서 사라지게 된다. 따라서 사고 발생 시점 및 지점으로부터 무한정 시간동안 도로의 상류부 종점까지 분석을 할 필요가 없다는 것이다. 그렇지 않을 경우, 다른 사고로 인한 여파를 계산에 포함시키는 등 사고로 인한 혼잡을 과대추정하게 될 가능성이 있다. 반면에, 지나치게 적은 시간대와 공간을 분석 대상으로 설정할 경우, 사고의 여파에 대한 절단된(censored) 결과를 추정하게 되어 결론적으로 사고로 인한 혼잡을 과소추정하게 될 가능성이 있다. 따라서 분석을 위한 적정 시공간적 영역의 설정이 매우 중요하다.

본 연구에서는 사고로 인한 시간적 영향권 설정을 위하여 교통사고 처리시간의 평균값을 고려하였다. 2008년 고속도로 발생 교통사고의 평균 처리시간은 45분으로 나타났으며, 본 연구에서는 이 시간의 4배인 3시간을 고려하였다. 비록 사고로 인한 시간적 영향권의 설정이 특별한 근거없이 설정되었지만, 사고 처리시간 평균의 4배를 고려하였기 때문에 사고로 인한 시간적 영향권 설정은 타당하게 설정된 것으로 판단된다.

또한, 공간적 영향권은 사고 발생 지점으로부터 상류부 33km 지점까지로 설정하였다. 이 값의 설정을 위하여 캘리포니아에서 수행된 연구 사례(Chung, 2008)를 참조하였으며, 이 연구에서 사고 발생으로 인한 혼잡 여파는 최대 32.9km(20.44mile)까지 미치는 것으로 나타났다. 또한, 개정된 도로용량편람에 의하면 설계속도 120km/h의 고속도로의 경우 차로별 용량은 약 2,300대/시(건설교통부, 2001)이고, 고속도로에서 차로별 최대 밀도는 약 131대/km(211대/mile)이며, 용량시 밀도는 28대/km/차로이기 때문에, 교통량-밀도 관계식을 triangular 모형으로 가정할 경우 충격파가 성장할 수 있는 최대 속도는 약 22km/h이다<sup>2)</sup>. 그러나 일반적으로 교통사고 발생시 모든 차로가 차단되는 경우는 매우 드물며, 혼잡관리를 위하여 갓길(shoulder)을 활용하기도 한다. 또한, 상류부의 통행량은 용량보다 낮은 수준으로 통행되는 것이 일반적이다. 따라서 분석에 사용될

33km는 최대 가능 충격파 속도의 1/2 수준인 시간당 11km 수준을 나타내는 것이기 때문에 타당하게 설정된 것으로 판단된다.

### 4) 사고로 인한 혼잡의 추정

설정된 시공간적 영역에 대하여 관별식을 적용할 경우, <그림 3>과 같이 진하게 표시되는 혼잡영역을 구축하게 된다. 이 영역을 구성하는 각 셀에 대한 시간대 및 관련 구간의 속도와 평균속도, 통행량, 구간의 거리를 구할 수 있기 때문에, 각 사고로 인한 비 반복적 발생 혼잡  $T$ 는 대-시의 단위에서 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$T = \sum_{\forall \text{ 혼잡영역 } j,m} \max \left\{ L_j \cdot \left[ \frac{1}{\widehat{s_{jm}}} - \frac{1}{\overline{s_{jm}}} \right] \cdot q_{jm}, 0 \right\} \quad (3)$$

이 식에서 혼잡영역은 <그림 3>에서 음영으로 표시된 영역을 나타내며,  $j$ 와  $m$ 은 이 혼잡영역을 구성하는 각 셀에 대한 구간과 시간대를 각각 나타낸다. 또한,  $L_j$ 는 구간  $j$ 의 거리(km)를 나타내며,  $\widehat{s_{jm}}$ ,  $\overline{s_{jm}}$ ,  $q_{jm}$ 은 각각  $m$  시간대에서 구간  $j$ 에 대한 통행속도(km/h), 평균속도(km/h), 통행량(대)을 나타낸다.

### 3. 교통사고로 인한 혼잡 추정 결과

비록 총 2,445건의 교통사고 자료에 대하여 혼잡을 추정하였으나, 이중 2,227건의 교통사고 자료에 대하여 혼잡이 성공적으로 추정되었다. 분석 결과 2008년 고속도로에서 발생한 2,227건의 교통사고에 대한 총 혼잡은 1,768,634.51대-시로 나타났으며, 교통사고별 최소 혼잡은 0대-시, 최대 혼잡은 75,811.22대-시, 혼잡의 중앙값은 79.45대-시, 교통사고 1건당 평균 혼잡은 794.18대-시, 혼잡의 표준편차는 333.18대-시로 나타났다.

<표 4>는 고속도로별 교통사고로 인한 비 반복적 발생 혼잡에 대한 기술통계량을 나타낸 것이다. 이 표에 나타난 것처럼, 비록 제2중부 고속도로에서 발생한 사고는 9건에 불과하지만, 사고 1건당 평균 혼잡이 3,362.15대-시로 다른 고속도로 대비 가장 높게 나타났다. 반면, 무안-광주간 고속도로는 사고 1건당 평균 혼잡은 0.22대-시로 가장 낮게 나타났다. 이러한 결과는 도로별 교통량 수준과 도로별 및 지역별 사고 발생시 대처에 의한 것으로

2) 상류부의 통행량은 용량으로 접근하며, 사고 발생 지점이 완전히 차단된 경우를 의미함

<표 4> 고속도로 별 2008년 교통사고로 인한 비 반복적 발생 혼잡

노선명	사고 수	혼잡(대-시)			노선명	사고 수	혼잡(대-시)		
		총량	평균	최대			총량	평균	최대
경부	461	804,742.67	1,745.65	75,811.22	마산외곽	16	2,759.22	172.45	917.29
남해	185	82,568.26	446.31	9,633.21	남해제2지선	16	5,146.07	321.63	3,505.35
서해안	240	281,304.71	1,172.10	20,019.04	제2경인	17	4,846.33	285.08	703.23
울산	14	2,026.25	144.73	1,265.78	경인	26	14,868.87	571.88	3,982.34
호남	154	9,323.99	60.55	1,366.81	호남지선	39	7,118.02	182.51	1,553.82
당진-상주	23	345.53	15.02	117.34	고창-담양	14	106.92	7.64	39.76
중부	197	11,663.10	59.20	1,114.83	대전남부순환	10	95.42	9.54	22.03
제2중부	9	30,259.33	3,362.15	23,436.23	구마	19	4,860.63	255.82	1,396.69
평택-제천	10	4,979.36	497.94	2,241.65	중앙지선	10	899.65	89.96	280.68
중부내륙	165	46,603.89	282.45	6,001.63	울림곡	19	315.10	16.58	111.75
영동	212	199,714.98	942.05	17,393.64	대구-포항	49	6,745.19	137.66	2,556.97
중앙	117	16,781.28	143.43	4,098.04	무안-광주	8	1.78	0.22	0.60
동해	15	261.00	17.40	94.83	익산-장수	13	134.42	10.34	31.89
서울외곽순환	169	230,162.52	1,361.91	18,686.21	계	2,227	1,768,634.51	794.18	75,811.22

판단된다. 따라서 본 연구에서 제시된 결과는 각 고속도로별 사고로 인한 혼잡을 제시하였기 때문에 각 고속도로별 사고로 인한 혼잡관리 프로그램의 투자 우선순위 설정 등에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

IV. 결론 및 향후과제

본 연구는 고속도로에서 발생한 교통사고로 인한 비 반복적 발생 혼잡을 추정하기 위한 방법을 제시하였다. 제시된 방법은 도로 구간별, 요일별, 5분 단위 시간대별 연평균 속도와 교통사고로 인해 낮아진 속도와의 차이를 활용하는 비교적 간단한 방식이다. 또한, 이 방법은 기존에 제시된 충격과 이론 및 결정적 대기행렬 이론에서 요구하는 구체적인 교통사고 정보(즉, 사고로 인한 차로 차단 정보, 사고 발생 상류부 도로의 용량 등)가 없을지라도, 이로 인한 혼잡의 시·공간적 여파 추정이 가능하다.

제안된 방법을 활용하면 교통사고로 인한 교통 혼잡의 계량화가 가능하기 때문에, 교통사고로 인한 지체량과 같은 지표는 향후 교통안전 프로그램의 수행 효과분석에 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 각 도로별 사고에 따른 평균 지체량의 구축이 가능하기 때문에 도로별 교통사고 대응 전략의 수립을 위한 기반 정보로 활용될 것으로 판단된다. 비록 본 연구에서는 비 반복적으로 발생하는 사건 중 교통사고로 인한 혼잡을 추정하였지만, 제안된 방법을 적용하여 기상악화 및 공사로 인한 비 반복적 발생 혼잡의 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다. 현재 미국 및 캐나다 등지에서는 반복적으로 발

생하는 혼잡 뿐 아니라 비 반복적으로 발생하는 혼잡도 추정하여 각종 교통관련 계획에 활용하고 있다. 따라서 우리나라도 제안된 추정방법을 활용하여 비 반복적으로 발생하는 혼잡에 대한 비용을 추정하고 교통관련 계획에 활용해야 할 것으로 기대한다.

또한, 본 연구에서는 전국 고속도로에서 발생한 교통사고로 인한 비 반복적 발생 혼잡의 추정을 위해 비교적 대용량의 교통류 자료를 활용하였다. 비록 전산장비의 발전과 대용량 자료의 처리에 필요한 DBMS가 발전하고 있지만, 이러한 대용량 자료를 활용하여 정기적으로 혼잡을 추정하기 위해서는 관련 자료의 수집 및 계산에 많은 부하가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구의 결과를 보다 세밀하게 분석하여 개별 교통사고에 대한 비 반복적 발생 혼잡의 원단위 산출에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다. 즉, 교통사고의 특성과 발생 시·공간적 특성에 기반하여 비 반복적 발생 혼잡의 원단위 산출은 향후 수집된 교통사고 자료만을 활용하여 대한 비 반복적 발생 혼잡의 유추를 가능하게 할 것이다.

마지막으로 본 연구에서는 혼잡영역의 설정을 위하여 경험적인 방법(empirical method)을 통하여 교통사고로 인해 낮아진 속도와 교통의 동적특성을 구분하려 하였다(관별식에서의  $\alpha$  값을 설정). 또한, 계산의 효율을 높이기 위하여 사고로 인한 여파에 대한 시공간적 경계조건(boundary condition)을 설정하였으며, 이 경계조건의 설정은 기존 연구사례와 분석자의 주관적 판단에 의하여 이루어졌다. 이러한 점이 본 연구의 단점으로 판단되며, 향후 이 부분에 대한 보다 객관적인 설정을 위한 연구가 요구된다.

## 참고문헌

1. Caltrans (1999), "Statewide Highway Congestion Monitoring Program. HICOMP Report", Division of Traffic Operations, Caltrans, Sacramento, California.
2. Chung, Y. (2008), "Spatio-Temporal Accident Impact Estimation Model and its Applications: Using Binary Integer Programming and Survival Analysis", VDM Verlag, Berlin, Germany.
3. Dowling, R., Skabardonis, A., Carroll, M., and Wang, Z. (2004), "Methodology for Measuring Recurrent and Nonrecurrent Traffic Congestion", Transportation Research Record, 1867, pp.60~68.
4. Kwon, J., Mauch, M., and Varaiya, P. (2006), "Components of Congestion: Delay from Incidents, Special Events, Lane Closures, Weather, Potential Ramp Metering Gain, and Excess Demand". Transportation Research Record, 1959, pp.84~91.
5. Lighthill, M. J., and Whitham, G. B. (1955), "On Kinematic Waves. II. A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads", Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 229(1178), pp.317~345.
6. Lindley, J. A. (1986), "Quantification of Urban Freeway Congestion and Analysis of Remedial Measures. FHWA", U.S. Department of Transportation.
7. Lomax, T., S. Turner, G. Shunk, H. S. Levinson, R. H. Pratt, P. N. Bay, and G. B. Douglas (1997), "NCHRP Report 398: Quantifying Congestion. Volume 2: User's Guide", TRB, National Research Council, Washington, D.C..
8. OECD (2007), "Managing Urban Traffic Congestion", OECD publishing.
9. Recker, W., Chung, Y., and Golob, T. (2005), "A Tool for the Incorporation of Non-Recurrent Congestion Costs of Freeway Accidents in Performance Management", UCB-ITS-PRR-2005-30.
10. Skabardonis, A., and Geroliminis, N. (2004), "Development and application of methodologies to estimate incident impacts", 2nd International Congress on Transportation Research in Greece, Athens, Greece.
11. Skabardonis, A., Varaiya, P., and Petty, K. (2003), "Measuring Recurrent and Nonrecurrent Traffic Congestion", Transportation Research Record, 1856, pp.118~124.
12. 건설교통부(2001), "도로용량편람".
13. 조한선·박인기·이동민·박준석 (2007), "교통혼잡비용 추정방법 개선", 한국교통연구원.

✉ 주 작 성 자 : 정연식

✉ 교 신 저 자 : 정연식

✉ 논문투고일 : 2009. 11. 17

✉ 논문심사일 : 2009. 12. 31 (1차)

2010. 2. 23 (2차)

✉ 심사판정일 : 2010. 2. 23

✉ 반론접수기한 : 2010. 8. 31

✉ 3인 익명 심사필

✉ 1인 abstract 교정필